

УДК 621.3.082

ДАСЛЕДАВАННЕ ПРАХОДЖАННЯ СІГНАЛА ПРАЗ СЦЕНКУ НАФТАПРАВОДА ДЛЯ СІСТЭМЫ КІРАВАННЯ ЎНУТРЫТРУБНЫМ ГЕРМЕТЫЗАТАРАМ

**М. І. ВЯХІРАЎ, Ю. В. КРЫШНЕЎ, А. А. НАУМУК, А. У. САХАРУК,
А. В. МЕЛЬНІКАЎ**

*Установа адукацыі «Гомельскі дзяржаўны тэхнічны
ўніверсітэт імя П. В. Сухого», Рэспубліка Беларусь*

Уводзіны

З мэтай правядзення рамонтна-эксплуатацыйных работ на нафтаправодзе ў цяперашні час выкарыстоўваюцца кіруемыя ўнутрытрубныя герметызатары [1]. Прынцып дзеяння герметызатара заключаецца ў кіруемым перамяшчэнні яго герметызавальных абшэвак у кірунку ўнутраных сценак нафтаправода за кошт энергіі ціску нафты аж да механічнай фіксацыі ўсяго гермецізатара. Пасля гэтага герметызатар утрымлівае гідрастатычны ціск слупа нафты на час правядзення рамонтных прац.

Для забеспячэння магчымасці выяўлення герметызатара, прыёму кантрольнай інфармацыі і перадачы каманд кіравання, неабходна стварыць надзейны бесправодны канал сувязі з наземнымі кіруючымі прыладамі. Асабліваасці асяроддзя распаўсюджвання сігнала не дазваляюць выкарыстоўваць для гэтай мэты існуючыя тыпавыя спосабы і апаратуру бесправоднай сувязі.

Перадача сігнала мае наступныя асабліваасці. Нафтаправод залягае на глыбіні 1,5–4 м пад паверхняй зямлі. У адрозненне ад паветра, дзе, да прыкладу, радыёсігнал распаўсюджваецца практычна свабодна, у дадзеным выпадку на шляху сігнала прысутнічае шэраг дадатковых перашкод: нафта, якая з'яўляецца складаным арганічным злучэннем; сценка нафтаправода (сталь таўшчыняй 10–12 мм); глеба – складанае злучэнне арганічных і неарганічных рэчываў, ад дынамічна зменлівых фізіка-хімічных уласцівасцяў якіх залежаць яе адноснае дыэлектрычная і магнітная пранікальнасць. Асяроддзе распаўсюджвання сігнала з'яўляецца спецыфічным, і патрабуе зусім іншага падыходу да забеспячэння перадачы/прыёму сігнала ў параўнанні з выпадкам забеспячэння інфармацыйнага канала ў паветраным асяроддзі.

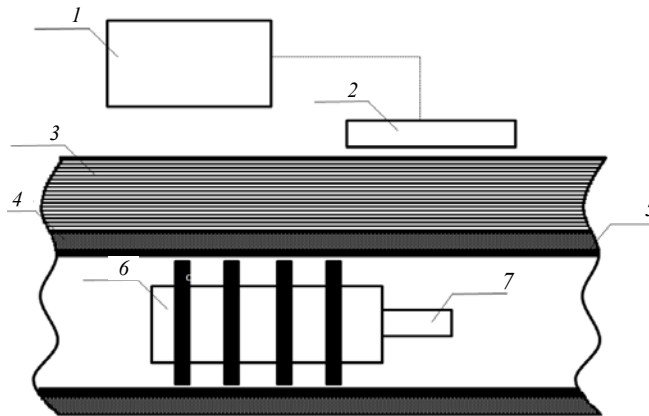
Адным з практычных спосабаў перадачы сігнала ў дадзеных умовах з'яўляецца выкарыстанне магнітнай сувязі, якая рэалізуецца шляхам прымянення пары «індуктар–магнітапрымач» [1]. Для арганізацыі дуплекснага канала сувязі і ў герметызатары, і ў наземнай прыладзе неабходна ўсталяваць па адным індуктары і магнітапрымачу.

Мэтай даследавання з'яўляецца аналітычнае і эксперыментальнае вызначэнне залежнасці каэфіцыента згасання сігнала пры праходжанні праз сценку нафтаправода ад частаты сігнала і намагнічанасці сценкі.

Разлік згасання сігнала пры праходжанні праз сценку нафтаправода

Для вызначэння патрабаванняў да характарыстык прыемаперадатчыкаў, якія ажыццяўляюць перадачу сігнала ў нафтаправод і назад, неабходна разлічыць згасанне сігнала.

На мал. 1 прадстаўлена размяшчэнне фізічных асяроддзяў, якія пераадолюе сігнал паміж унутрытрубнай і наземнай прыладамі.



Мал. 1. Асяродзі проходження сигналу паміж унутрытрубнай і наземнай прыладамі:
1 – наземная прылада; 2 – прыёмопередаючы модуль наземнай прылады; 3 – глеба;
4 – ізаляцыйнае пакрыццё; 5 – сталевая сценка трубы; 6 – унутрытрубны герметызатар;
7 – прыёмопередаючы модуль унутрытрубнай прылады

Асноўнае згасанне пры праходжанні сігнала ствараецца сценкай нафтаправода. Таму далей колькасна і эксперыментальна даследуем толькі гэты складнік, прыняўшы дапушчэнне, што структура «сталёвая труба – нафтаправод» размяшчаецца ў паветранай прасторы (глеба 3 і ізаляцыйнае пакрыццё 4 адсутнічаюць). Уздзеянне нафтаправода на сігнал будзем характарызаваць каэфіцыентам экранавання S_n , які вызначаецца як адноснасць напружанасці магнітнага поля крыніцы ў якой-небудзь кропцы прасторы пры наяўнасці экрана (сценкі нафтаправода) да значэння поля ў гэтай жа кропцы без экрана [2].

Крыніцай з’яўляецца цыліндрычная шпулька з воссю, раўналежнай восі сталёвай трубы. У разліку труба і крыніца лічацца бясконцымі і вырашаецца цыліндрычная задача. Пры гэтым з прычыны малога электрычнага дыяметру шпулька замяняецца ніткай сінфазнага магнітнага току. Нітка размяшчаецца на восі трубы і аналагічна шпульцы стварае ўнутры, у сценцы трубы і ў вонкавай прасторы толькі падоўжны складнік магнітнага поля і азімутальны складнік электрычнага поля.

Рашэнне раўнанняў Максвелла для складнікаў электрамагнітнага поля ў кожнай з абласцей шукаецца ў выглядзе бясконцых шэрагаў па цыліндрычных функцыях, у якіх для размешчанай на восі трубы крыніцы застаюцца толькі складнікі з цыліндрычнымі функцыямі нулявога парадку.

У выніку для каэфіцыента экранавання сталёвага трубаправода атрымаем [2]:

$$S_n = \frac{1}{ch(k_M t)} \frac{1}{1 + \left[\frac{Z_0}{Z_M} \frac{J_n(k_D r_3) H_n^{(2)}(k_D r_3)}{J_n(k_D r_3) H_n^{(2)'}(k_D r_3) - J_n'(k_D r_3) H_n^{(2)}(k_D r_3)} + \rightarrow \right.} \quad (1)$$

$$\left. \frac{1}{\rightarrow + \frac{Z_M}{Z_0} \frac{J_n'(k_D r_3) H_n^{(2)'}(k_D r_3)}{J_n(k_D r_3) H_n^{(2)'}(k_D r_3) - J_n'(k_D r_3) H_n^{(2)}(k_D r_3)} \right] th(k_M t)}$$

дзе $k_M = \sqrt{i\omega\mu\sigma}$ – каэфіцыент распаўсюджвання ў метале; $k_D = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$ – каэфіцыент распаўсюджвання ў дыэлектрыку; $\omega = 2\pi f$ – вуглавая частата; f – лінейная частата;

$Z_M = \sqrt{i\omega\mu/\sigma}$ – хвалевае супраціўленне металу; $Z_0 = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ – хвалевае супраціўленне дыэлектрыка; J_n і $H_n^{(2)}$ – цыліндрычныя функцыі першага (Беселя) і другога (Ханкеля) роду; t – таўшчыня экрана; r_Σ – радыус экрана. Тут і далей n неабходна прыняць роўным нулю.

Маючы на ўвазе, што хвалевае супраціўленне дыэлектрыка Z_0 істотна больш за хвалевае супраціўленне металу Z_M , гэта значыць $\frac{Z_0}{Z_M} \gg \frac{Z_M}{Z_0}$, другім членам сумы ў дужках можна занядаць. Фізічна гэта абгрунтоўваецца наступным чынам: першы член сумы ў квадратных дужках адпавядае адлюстраванню энергіі на мяжы дыэлектрык – экран (пры $r = r_\Sigma$), а другі – адлюстраванню на мяжы экран – дыэлектрык (пры $r = r_\Sigma + t$). Пры электрычным тоўстым экране (згасанне $k_M t > 1,5$), што практычна заўсёды мае месца, ролю другой мяжы можна не ўлічваць. Тады формула разліку каэфіцыента экранавання прыме выгляд:

$$S_n = \frac{1}{ch(k_M t)} \frac{1}{1 + \frac{Z_0}{Z_M} \frac{J_n(k_D r_\Sigma) H_n^{(2)}(k_D r_\Sigma)}{J_n(k_D r_\Sigma) H_n^{(2)'}(k_D r_\Sigma) - J_n'(k_D r_\Sigma) H_n^{(2)}(k_D r_\Sigma)} th(k_M t)}. \quad (2)$$

Выкарыстоўваючы рэкурэнтныя суадносіны цыліндрычных функцый першага і другога роду: $J_n(x) H_n^{(2)'}(x) - J_n'(x) H_n^{(2)}(x) = \frac{2}{i\pi x}$, атрымаем выраз для разліку каэфіцыента экранавання магнітнага поля ў наступным выглядзе:

$$S_n = \frac{1}{ch(k_M t)} \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{Z_0}{Z_M} i\pi k_D r_\Sigma J_n(k_D r_\Sigma) H_n^{(2)}(k_D r_\Sigma) th(k_M t)}. \quad (3)$$

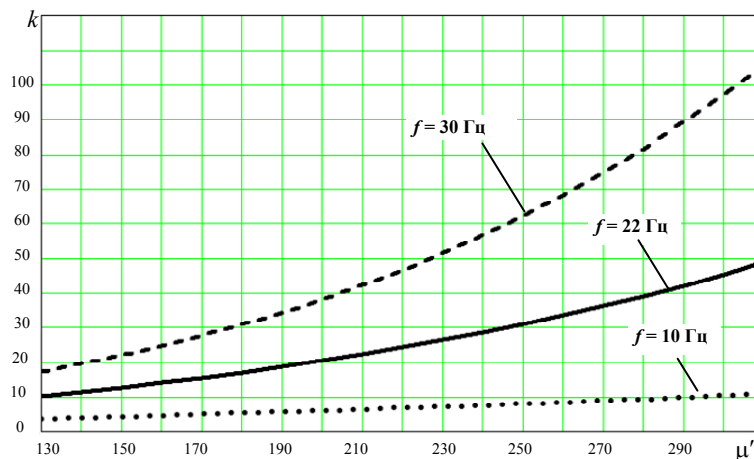
Каэфіцыент згасання сігналу k з'яўляецца велічыней, зваротнай каэфіцыенту экранавання і характарызуе тое, у якой ступені сігнал затрымліваецца экраніруючым пластом. Адзначым, што ў агульным выпадку каэфіцыент экранавання S_n з'яўляецца комплекснай велічыней, таму пры вызначэнні каэфіцыента згасання сігналу будзем разглядаць модуль каэфіцыента экранавання.

У сувязі з тым, што нафтаправоды з прычыны функцыянавання станцый катоднай абароны, як правіла, працуюць ва ўмовах намагнічанасці, пры аналізе каэфіцыента згасання ўяўляе цікавасць яго залежнасць ад адноснай магнітнай пранікальнасці сталі $\mu' = \frac{\mu}{\mu_0}$, дзе $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітная пранікальнасць вакууму. Залежнасць каэфіцыента згасання ад μ' пры розных частотах сігналу, атрыманая лікавымі метадамі (з улікам частотнай залежнасці функцый Беселя і Ханкеля), прадстаўлена на мал. 2.

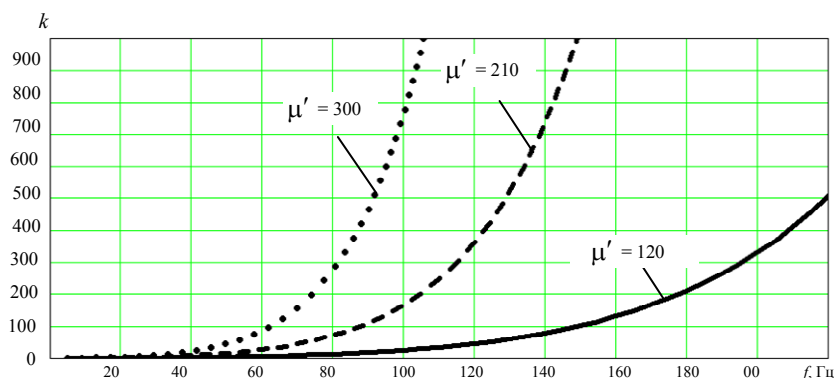
З пункту гледжання выбару аптымальнай частоты канала сувязі неабходна прааналізаваць частотную залежнасць каэфіцыента згасання. На мал. 3 паказана залежнасць каэфіцыента згасання ад частаты сігналу пры рознай магнітнай пранікальнасці сталі (гэта значыць пры рознай ступені намагнічанасці).

Пры любых значэннях μ' згасанне сігналу ўзрастае з павелічэннем частоты, прычым тым хутчэй, чым больш намагнічанасць сталі (велічыня μ'). Максімальны ўзровень перадаванага сігналу будзе назірацца ў вобласці нізкіх частот. Аднак варта

адзначыць, што пабудова канала сувязі ў вобласці вельмі нізкіх частот праблематычна па прычыне нерэальна вялікіх патрэбных габарытаў індуктара і магнітапрымача, а таксама ў сувязі з крытычным павелічэннем часу перадачы камандных кодаў у герметизатор, які рухаецца з сярэдняй хуткасцю блізу 5 км/г. Аптымальным рашэннем з'яўляецца праца ў дыяпазоне частот 20–25 Гц.



Мал. 2. Залежнасць каэфіцыента згасання ад магнітнай пранікальнасці матэрыяла сталі пры розных частотах



Мал. 3. Залежнасць каэфіцыента згасання ад частаты сігналу пры розных магнітных пранікальнасцях сталі

Эксперыментальнае вызначэнне магнітнай пранікальнасці сталі

Для вызначэння магнітнай пранікальнасці сталі, якая ўжываецца ў вырабе нафтаправода, была праведзена серыя эксперыментаў. З матэрыяла сценкі трубы нафтаправода былі выразаны стрыжні тараідальнай формы, на якіх затым былі размешчаны першасная і другасная абмоткі трансфарматара (мал. 4). Далей, паводле стандартных метадык [3] быў праведзены шэраг вопытаў па вызначэнні характарыстык намагнічвання (гэта значыць залежнасці магнітнай пранікальнасці ад напружанасці магнітнага поля) тараідальных стрыжняў з канструкцыйнай сталі, у ходзе якіх ускосна былі атрыманы разліковыя значэнні магнітнай пранікальнасці.

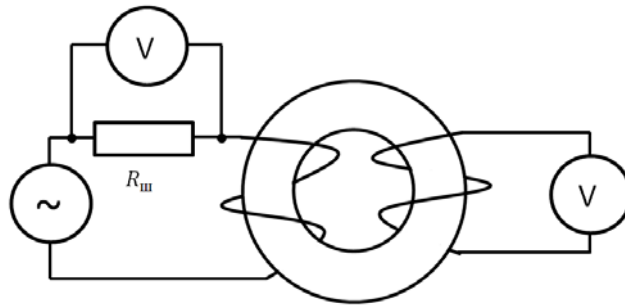
Магнітную пранікальнасць можна вылічыць паводле формулы

$$\mu' = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (4)$$

Магнітняя індукцыя вызначаецца як:

$$B = \frac{U}{SN\omega}, \quad (5)$$

дзе N – колькасць віткоў; $S = ab$ – плошча сячэння стрыжня; U – напружанне другаснай абмоткі; $\omega = 2\pi \cdot 22$ (частата сігнала, якая падчас эксперымента была прынята 22 Гц).



Мал. 4. Схема эксперымента для вызначэння характарыстык намагнічвання

Напружанасць магнітнага поля ў доўгай шпульцы, згодна з тэарэмай аб цыркуляцыі, вызначаецца як:

$$H = \frac{IN}{l_c}, \quad (6)$$

дзе I – ток у першаснай абмотцы; $l_c = \frac{\pi(D+d)}{2}$ – даўжыня ферамагнітнага стрыжня.

Табліца 1

Вынікі вымярэнняў магнітнай пранікальнасці канструкцыйнай сталі

Значэнне току ў першаснай абмотцы тора I , мА	Значэнне напружання ў другаснай абмотцы тора U , мВ	Значэнне магнітнай пранікальнасці μ'
18	5	127,1
42	12	130,8
96	31	147,8
142	59	190,2
192	81	193,1
238	141	271,2
269	166	282,5
300	170	289,9
347	226	298,1
416	277	304,8
618	416	308,1

Такім чынам, па выніках вопытаў устаноўлена, што значэнні магнітнай пранікальнасці μ' для ўзору канструкцыйнай сталі на частаце 22 Гц знаходзяцца ў дыяпазоне ад 127,1 да 308,1.

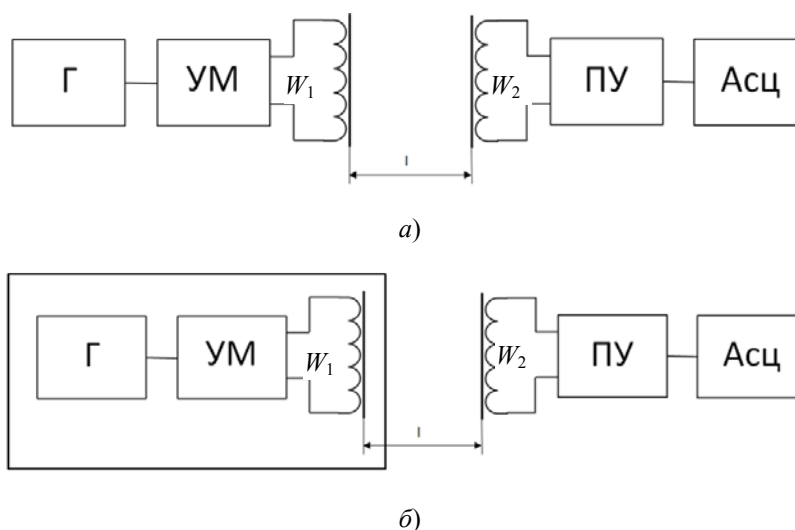
Экспериментальнае вызначэнне згасання сігнала пры праходжанні праз сценку нафтаправода

Для вызначэння згасання сігнала быў праведзены эксперымент з выкарыстаннем участку нафтаправода, у ходзе якога былі разгледжаны два выпадкі вымярэння сігнала: 1) перадатчык знаходзіцца па-за трубным кантэйнерам (мал. 5, а); 2) перадатчык змешчаны ў трубны кантэйнер (мал. 5, б).

Каэфіцыент згасання сігнала ў дадзеным выпадку вызначаецца наступным чынам:

$$k = \frac{U_1}{U_2}, \quad (7)$$

дзе U_1 – напружанне на магнітапрымачы без экрана; U_2 – напружанне на магнітапрымачы з экранам.



Мал. 5. Схема эксперыменту:

а – унутрытрубная прылада не змешчана ў трубны кантэйнер; б – унутрытрубная прылада змешчана ў кантэйнер; Г – генератар сінусаідальнага сігнала частатой 22 Гц; УМ – узмацняльнік магнутнасці; ПУ – папярэдні ўзмацняльнік; Асц – асцылограф; W_1 і W_2 – індуктары і магнітапрымач адпаведна; l – адлегласць паміж індуктарамі і магнітапрымачом

Табліца 2

Экспериментальнае вызначэнне каэфіцыента згасання сігнала

Нумар вопыту	Амплітуда выхаднога сігнала ў вопыце з трубай, мВ	Амплітуда выхаднога сігнала ў вопыце без трубы, мВ	Каэфіцыент згасання
1	24	820	34,16
2	5,9	198	33,56
3	37,5	1240	33
4	15	416	27,8
5	44,8	1680	37,5
6	12,4	356	28,7
7	18,8	456	24,25
8	40	416	20,8

Па выніках эксперыменту сярэдняе значэнне каэфіцыента згасання сігнала складае: $k = 29,97$. Разлік k , як велічыні, зваротнай каэфіцыенту экранавання S_n у адпаведнасці з формулай (3), дае значэнні каэфіцыента згасання сігнала ў дыяпазоне ад 10,33 да 50,18. Такім чынам, эксперыментальныя даныя не выходзяць за межы разліковых значэнняў.

Висновы

1. Прааналізавана частотная залежнасць каэфіцыента згасання k сігнала, які перадаецца з нафтаправода на наземную кіравальную прыладу. Устаноўлена, што ўмовы перадачы сігнала пагаршаюцца з ростам частаты, а аптымальны з пункту гледжання перадачы сігнала частотны дыяпазон абмежаваны значэннямі 0–60 Гц.

2. Прааналізавана залежнасць каэфіцыента згасання k ад адноснай магнітнай пранікальнасці μ' матэрыяла сценкі нафтаправода (канструкцыйная сталь). Умовы перадачы сігнала пагаршаюцца з ростам μ' , гэта значыць намагнічанасці сталі.

3. Выкананы эксперыментальныя даследаванні ўзораў канструкцыйнай сталі, якая ўжываецца для вырабу нафтаправода: значэнні магнітнай пранікальнасці ляжаць у межах ад 127,1 да 308,1.

4. Выкананы эксперыментальныя даследаванні згасання сігнала пры праходжанні праз сценку нафтаправода: сярэдняе значэнне каэфіцыента згасання k складае 29,97 на частаце 22 Гц.

Літаратура

1. Разработка средств поиска, управления и контроля состояния внутритрубного тампона-герметизатора : справочная аб НДР / Гомел. дзярж. тэхн. ун-т імя П. В. Сухого. – Гомель, 2010. – 93 с. – № ДР 20101085.
2. Гроднев, И. И. Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот / И. И. Гроднев. – М. : Связь, 1972. – 112 с.
3. Сталь электротехническая. Методы определения магнитных и электрических свойств. Метод измерения относительной магнитной проницаемости и удельных магнитных потерь мостом переменного тока : ГОСТ 12119.6–98. – Введ. 1999–07–01. – Минск : Изд-во стандартов, 2000. – 9 с.
4. Оптимизация методов и средств внутритрубной диагностики с целью улучшения метрологических характеристик контрольно-измерительного диагностического снаряда : справочная аб НДР / Гомел. дзярж. тэхн. ун-т імя П. В. Сухого. – Гомель, 2014. – 122 с. – № ДР 20113948.
5. Праектаванне бесправаднага канала сувязі для кіравання клапанам кіруемага ўнутрытрубнага герметызатара / Ю. В. Крышнеў [і інш.] / Вестн. Гомел. гос. тэхн. ун-та ім. П. О. Сухого. – 2012. – № 1. – С. 29–33.
6. Система поиска, управления и контроля состояния внутритрубного герметизатора / Ю. В. Крышнев [и др.] // The civil protection '2011 : доклады 1 част Sixth scientific conference with international participation and exposition. – София : Акад. на МВР, 2011. – С. 50–55.
7. The monitoring and control system of the intrapipeline sealer / Y. Kryshneu [et al.] // ITELMS '2010 : materials of 5th International Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems, Panevezys, Lithuania, 2010. – С. 31–36.
8. Преимущества использования управляемого герметизатора для магистральных нефтепроводов / А. М. Бордовский [и др.] // Надежность и безопасность трубопроводного транспорта : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 22–25 нояб. 2011 г. / Полоц. гос. ун-т ; под общ. ред. проф. В. К. Липского. – Новополоцк, 2011. – С. 192–194.

Получено 14.10.2014 г.